

令和 6 年 9 月 10 日現在

機関番号：13904  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21H01367  
研究課題名（和文）Si上に選択エピタキシャル成長したGe層に対するウエ八面内バンドエンジニアリング  
  
研究課題名（英文）On-wafer band engineering for Ge epitaxial layers selectively grown on Si  
  
研究代表者  
石川 靖彦（Ishikawa, Yasuhiko）  
  
豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授  
  
研究者番号：60303541  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：化学気相堆積法により選択エピタキシャル成長したSi上Ge細線構造に対して、サブミクロン化に伴う「引張格子ひずみの緩和」と「SiNx外部応力膜による引張・圧縮格子ひずみの効率的印加」を適切に使い分けることで、Siウエ八面内でGe直接遷移ギャップを拡大・縮小することに成功した。このウエ八面内バンドエンジニアリングを利用することにより、光通信のC帯（1.530-1.565ミクロン）からL帯（1.565-1.625ミクロン）の波長域で動作するシリコンフォトニクス用Ge光変調器およびGe受光器を実現できる。単一組成のGe（Ge：100%）のみで広い波長域で動作する光通信デバイスの作製が可能である。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、Geサブミクロン細線構造中の格子ひずみを適切に変化させることにより、Siウエ八面内でGeの直接遷移バンドギャップを制御することを可能とした点にある。混晶に頼らずに単一組成のGeでバンドギャップの面内制御を実現したことで、異なる波長で動作する光デバイスをSiチップ上に集積する工程を大幅に簡略化することが可能になる。大容量・低電力の光通信デバイスを作製する技術として社会に貢献できる。また、本研究の手法はIII-V族半導体の光デバイスにも適用できるものであり、波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In a sub-micron wire structure of Ge epitaxially grown by selective-area chemical vapor deposition, the direct gap of Ge is successfully controlled on a Si wafer by appropriately using "relaxation of tensile lattice strain" and "efficient application of tensile or compressive lattice strain by SiNx external stressor". Regarding the Si photonics, this on-wafer band engineering enables Ge optical modulators and photodetectors on Si operating in the C (1.530-1.565 microns) and L (1.565-1.625 microns) bands of optical communications. It is important that the optical devices operating in a wide wavelength range is realized with only a single composition of Ge (Ge: 100%).

研究分野：シリコンフォトニクス

キーワード：シリコンフォトニクス ゲルマニウム バンドエンジニアリング 直接遷移バンドギャップ 動作波長制御

### 1. 研究開始当初の背景

シリコンフォトニクスは、Si 集積電子回路の作製で培われた微細加工プロセスを用いて光デバイスを作製・集積する技術である。光通信波長帯 (1.3–1.6 μm) で動作する光導波路、合分波器、受光器等を Si 上にモノリシック集積できる。データセンタのラック間通信を中心に Si 光送受信チップが利用され、低電力化に貢献している。光信号を電気信号に変換する受光器は光通信 (光受信) に欠かせない素子である。Si は通信波長帯で光吸収がないため、受光器には Ge が利用される。Ge は Si と同じ IV (14) 族半導体であり、間接遷移型のバンド構造をもつ。間接遷移型であるが、直接遷移バンドギャップ (Γ点) が 0.80 eV (光吸収端波長 1.55 μm に相当) であることから、波長 1.55 μm 以下で強い光吸収を示す。このため受光器として利用されている。Si 上にエピタキシャル成長した Ge 層では、光吸収端が約 1.61 μm まで長波長シフトする。Ge 層の面内に引張格子ひずみ (0.2%) が内蔵され、直接遷移ギャップが約 0.77 eV に収縮することによる。研究代表者の石川らが見出した現象であり、光通信で特に重要な 1.55 μm 帯 (C 帯: 1.530–1.565 μm) の高効率受光に欠かせない。4%格子不整合による圧縮ひずみは成長初期に緩和する一方、引張ひずみが結晶成長温度からの冷却時に Si と Ge の熱膨張係数差により自発的に発生する。

電気信号を光信号へ変換 (光送信) する光強度変調器は、光送受信器における消費電力の律速因子である。Ge は受光器だけでなく、電界吸収型光強度変調器へも応用できる。電界強度に応じて光吸収が増減する Franz-Keldysh (FK) 効果により強度変調できる。従来の Si 光変調器に比べ、素子を小型化できるため低電力化 (10 fJ/bit 台) に有効だが、1.55 μm 帯で動作しない点に課題がある。FK 効果は主に波長 1.6 μm 以上に現れる。1.55 μm 帯での光変調には、FK 効果の現れる波長域を 50 nm 以上短波長化する必要がある。従来は Ge 中へ僅かに Si (~1%) を導入した SiGe 混晶を用いて直接遷移ギャップを拡大する方法がとられてきた。単体素子では使用波長に応じて混晶組成を制御すればよいが、複数波長を同時利用する波長多重チップ作製では同一ウエハ上に異なる組成の SiGe 層を逐一エピタキシャル成長しなければならない。一つの組成で効率的に光変調できる波長幅は約 15 nm であり、組成を 1%以下の精度で制御する必要もある (組成が 1%増える毎にギャップは約 30 meV 拡大: 光吸収は約 60 nm 短波長化)。工程数や複雑さが増し、集積化の利点が失われる。SiGe 等の混晶を利用せず、単一組成の Ge (Ge: 100%) のみを利用して電界吸収型光強度変調器の動作波長を制御できるか、という点に本研究の問いがある。

### 2. 研究の目的

Si ウエハ面内で Ge エピタキシャル層の直接遷移バンドギャップを制御し、Ge 光強度変調器の動作波長制御に応用することを目的とする。

単一組成の Ge (Ge: 100%) のみの利用にこだわったバンドギャップ制御を試みた。目標とするバンドギャップの制御範囲は、0.77 eV (初期状態) から 0.82 eV (波長 1.51 μm に相当) とし、光通信の C 帯 (1.530–1.565 μm) をカバーする。

### 3. 研究の方法

#### (1) アプローチ

ウエハ上の Si 表面露出部にのみ Ge をエピタキシャル成長する選択成長を用いることを想定する。加工損傷がなく、Ge の低転位化にも効果的なため受光器作製に広く用いられている。選択成長した細線状 Ge に対して、図 1 に示すように「細線幅縮小による内蔵引張ひずみの緩和」や「外部応力膜による圧縮ひずみの導入」を行い、直接遷移ギャップを拡大する。例えば 1.55 μm 帯での光変調には 0.80 eV 以上の直接遷移ギャップが必要である。無ひずみ もしくは 圧縮ひずみ印加の状態に相当する。

幅の広い Ge (>数 μm) では熱膨張係数差による内蔵引張ひずみが維持され、1.55 μm 帯で受光器として動作する。一方、細線幅を 1 μm 以下まで狭くした構造では、幅方向で引張ひずみが緩和する。バンドギャップが拡大し、光吸収が短波長化する。なお、細線の長さ方向の引張ひずみは残留し、ギャップ拡大を阻害する (長さも縮小すると光との相互作用長が不足して変調が不十分となる)。SiNx 応力膜を堆積し、細線の幅方向へ圧縮ひずみ印加を行う。長さ方向の引張ひずみの影響を相殺する以上の圧縮ひずみを導入することで、一層のバンドギャップ拡大が可能となる。

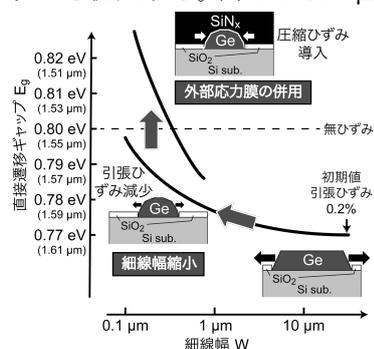


図 1 本研究で検討したバンドエンジニアリングの概念図。

## (2) ひずみ緩和の計算機シミュレーション

Ge を細線化した際の引張格子ひずみ緩和を理論的に調べるため、有限要素法を用いて応力/格子ひずみの分布をシミュレーションした。実験と同様に、Ge および Si(001)基板の厚さをそれぞれ  $0.5\ \mu\text{m}$  および  $525\ \mu\text{m}$  に設定し、Ge 細線幅を  $0.8\ \mu\text{m}$  から  $10\ \mu\text{m}$  までパラメータとして変化した。Ge 細線の側壁は、実験結果に基づき、傾斜したファセット面である  $\{113\}$  面および  $\{111\}$  面から構成されると仮定した。この構造を Ge の成長温度である  $700^\circ\text{C}$  から室温 ( $25^\circ\text{C}$ ) まで冷却し、熱膨張係数差による引張応力/格子ひずみを求めた。Ge の厚さ ( $0.5\ \mu\text{m}$ ) は臨界層厚 ( $1\ \text{nm}$  程度) に比べて圧倒的に大きいため、格子不整合によるひずみはないと仮定した。シミュレーションでは、Ge の熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比を、それぞれ  $5.9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ 、 $103\ \text{GPa}$ 、 $0.26$  とした。Si ではそれぞれ  $2.6 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ 、 $170\ \text{GPa}$ 、 $0.28$  とした。Ge 細線の外側の Si 表面は、Ge 選択成長のマスクである  $\text{SiO}_2$  層 (膜厚  $0.1\ \mu\text{m}$ ) で覆った。 $\text{SiO}_2$  の熱膨張係数、ヤング率、ポアソン比は、それぞれ  $5.5 \times 10^{-7}\ \text{K}^{-1}$ 、 $73.1\ \text{GPa}$ 、 $0.17$  とした。

## (3) 実験方法

4 インチ Si(001)ウエハ上に形成した  $\text{SiO}_2$  膜を加工し、 $[110]$  方向に沿った細線状 Si 露出部を形成した (i 線ステップ露光を使用)。線幅は約  $0.8\ \mu\text{m}$  から  $10\ \mu\text{m}$  程度まで変化させた。化学気相堆積 (Chemical vapor deposition : CVD) 装置を用い、Si 露出部に Ge を選択エピタキシャル成長した。原料ガスには Ar 希釈 9%  $\text{GeH}_4$  を用いた。2 段階成長法を用い、厚さ  $50\ \text{nm}$  の Ge バッファ層を  $370^\circ\text{C}$  の低温で成長し、その後  $700^\circ\text{C}$  の高温で Ge を成長した。膜厚は  $0.5\ \mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2$  マスクのないブランケット膜の場合) とした。走査電子顕微鏡 (scanning electron microscope: SEM) を用いて構造を評価した。プラズマ CVD 法を用いて Ge 細線表面に  $\text{SiN}_x$  外部応力膜を堆積した。原料ガスとして  $\text{N}_2$  希釈 10%  $\text{SiH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2$  を流量比 39:2:61 で供給した。RF パワーは  $100\ \text{W}$ 、温度は  $300^\circ\text{C}$  とした。応力の大きさおよび符号はチャンバー圧力により制御できる。圧力  $200\ \text{Pa}$  と  $50\ \text{Pa}$  の 2 種類を使用し、 $\text{SiN}_x$  膜の応力をそれぞれ  $+0.60\ \text{GPa}$  (引張) と  $-0.15\ \text{GPa}$  (圧縮) に変化させた。膜厚は引張  $\text{SiN}_x$  層が約  $500\ \text{nm}$ 、圧縮  $\text{SiN}_x$  層が約  $400\ \text{nm}$  であった。

Ge 細線の格子ひずみは顕微ラマン測定により評価した。波長  $457\ \text{nm}$  のレーザー光源およびアレイ型 Si 検出器を用い、室温でラマンスペクトルを測定した。レーザーパワーは  $1.0\ \text{mW}$ 、試料表面でのスポット径は約  $1\ \mu\text{m}$  である。Ge 中の  $1/e$  浸透深さは約  $20\ \text{nm}$  である。Ge 細線の直接遷移バンドギャップは顕微フォトルミネセンス (PL) により評価した。波長範囲  $1.4 - 1.7\ \mu\text{m}$  の PL スペクトルを室温で測定した。励起光源には波長  $785\ \text{nm}$  のレーザーを用いた。レーザーパワーおよびスポット径は、それぞれ  $4.0\ \text{mW}$  および約  $2\ \mu\text{m}$  であった。Ge 中の  $1/e$  浸透深さは約  $100\ \text{nm}$  である。細線化 (引張格子ひずみの緩和) による直接遷移バンドギャップ拡大・光吸収スペクトルの短波長化の効果を一層直接的に確認するために、Si-on-insulator ウエハ上の Si 光導波路と集積した Ge 細線横方向 pin 型受光器の受光感度 (responsivity) スペクトルを測定した。試料は技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA) より提供を受けた。細線幅は  $0.5$ 、 $0.8$ 、 $1.2\ \mu\text{m}$  (細線下部の幅) の 3 種類を用意した。長さは  $40\ \mu\text{m}$  とした。Ge 細線の膜厚は約  $200\ \text{nm}$  である。波長可変レーザー光源 ( $1.455 \sim 1.640\ \mu\text{m}$ ) からの光 (TE 偏波) をレンズファイバーを用いてチップ端のスポットサイズ変換器を介して Si 光導波路に結合した。結合損失は約  $-7\ \text{dB}$  である。サンプル温度は  $30^\circ\text{C}$  に制御した。

## 4. 研究成果

### (1) ひずみ分布のシミュレーション結果

図 2 に十分に長い Ge 細線の断面における格子ひずみ分布を示す。図 2(a) は幅  $10\ \mu\text{m}$  の結果であり、 $x$  (幅) 方向の引張格子ひずみ  $\epsilon_x$  は細線中央部においては  $0.20\%$  であった。 $y$  (長さ) 方向成分  $\epsilon_y$  の  $0.22\%$  と同程度であった (図 2(b))。約  $0.2\%$  という値は、Ge 薄膜の実験値と一致する。 $z$  (厚さ) 方向のひずみ  $\epsilon_z$  は約  $-0.15\%$  の圧縮であった。 $x$  および  $y$  方向に引張応力が作用することにより  $z$  方向は圧縮される。重要な点として、図 2(a) の  $\epsilon_x$  が端部に向かって減少していることが挙げられる。細線端部では弾性変形が可能となるため、格子緩和することを示している。図 2(d) の幅  $1\ \mu\text{m}$  の細線では、端部の格子緩和が細線全体に及ぶことになる。すなわち  $\epsilon_x$  はゼロに近い値となる。 $y$  (長さ) 方向にはひずみ緩和はなく、 $\epsilon_y$  は図 2(e) のように Ge 幅に依存せず  $0.22\%$  となった。一方、 $\epsilon_z$  の絶対値は、細線幅を狭くするにつれてわずかに減少した (図 2(f))。引張ひずみ/応力が  $x$  方向に減少したことによる。

図 3(a) に各方向の格子ひずみを細線幅に対してプロットした。 $\epsilon_x$  と  $\epsilon_z$  は細線幅が  $1\ \mu\text{m}$  以下になると、 $-\nu \epsilon_y$  (ポアソン比  $\nu = 0.26$ ) に近づく。幅を狭くすることで、二軸応力印加の状態からほぼ一軸応力印加の状態に変化することを意味している。図 3(b) に体積変化  $\Delta V/V$  に対応する格子ひずみの和  $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$  をプロットした。直接バンドギャップエネルギーの推定値  $E_g \sim E_{g0} + a(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)$  ( $E_{g0} = 0.802\ \text{eV}$ : 無ひずみ Ge の直接遷移バンドギャップ、 $a = -8.97\ \text{eV}$ : 変形ポテンシャル) も示した。なお、 $z$  方向の深さ位置 (Ge 細線表面、細線中央、および下部の Si との界面)

についてプロットしたが、Ge 細線中央部の値が光変調器応用において重要である。これは光パワーが Ge 細線の中心部付近で高くなるためである。図 3(b)は格子ひずみが Ge 細線上面でより緩和していることを示しており、幅 1  $\mu\text{m}$  未満ではほぼ一軸応力とみなせる。中央部や底面の界面でも顕著なひずみの緩和が見られる。細線中央部の直接遷移ギャップは幅 1  $\mu\text{m}$  では 0.789 eV に拡大する（幅が広い場合は 0.778 eV）。これは光吸収端波長が 1.594 から 1.572  $\mu\text{m}$  に、つまり 20 nm 以上の短波長シフトが起こることを意味する。

## (2) Si 上 Ge 細線構造を選択成長

図 4 は、Si 上に選択成長した Ge 細線の典型的な断面 SEM 像をまとめたものである。図 4(a)に示したように、底面幅が 5.5  $\mu\text{m}$  と比較的広い細線では、主に上部の(001)面と傾斜した{113}ファセット側壁からなるメサ構造が形成された。従来報告と同様である。側壁下端には、{112}面に相当する小さなファセットが観察された。細線中央の Ge 膜厚は 470 nm であり、設計値 (500 nm) とよく一致した。側壁の近くに Ge が若干盛り上がった部分も観察された。ファセット側壁からの Ge 原子の移動に起因するものと考えられる。盛り上がった部分の最大 Ge 膜厚は 530 nm であった。

細線を狭くすることで、上面の(001)面の面積が減少した。図 4(b)の幅 2.5  $\mu\text{m}$  の Ge 細線の厚さ/高さは、図 4(a)の盛り上がった部分の 530 nm にほぼ等しかった。細線を 1.5  $\mu\text{m}$  に狭めると、{113}面に隣接する側壁ファセットとして{111}面が現れた

(図 4(c))。図 4(d)の 0.9  $\mu\text{m}$  幅では、下端付近に垂直 ({110}面)に近いファセットも観察された。この面は、垂直方向から約 6°傾いており、{771}面に相当する。Ge の高さは、細線幅が 1.5  $\mu\text{m}$  および 0.9  $\mu\text{m}$  の場合、それぞれ 400 nm および 370 nm に減少した。図 4(d)の Ge 細線の断面は半円筒形、すなわち表面エネルギー (表面積) を最小化するような形状に近い。図 5 は引張応力 (+0.60 GPa) および圧縮応力 (-0.15 GPa) を内蔵する SiN<sub>x</sub>層を堆積した後の典型的な SEM 像である。いずれの場合も、SiN<sub>x</sub>層は Ge 細線を均一に覆っていることがわかる。

## (3) 細線幅縮小による引張格子ひずみの緩和および直接遷移バンドギャップ拡大

図 6(a)は、細線幅の異なる Ge 層に対するラマンスペクトルをまとめたものである。縦線はフィッティングに基づくピーク位置を示す。各スペクトルにおいて、Ge 層中の Ge-Ge 結合に対応するピークが 300  $\text{cm}^{-1}$  付近に観測された。100  $\mu\text{m}$  幅では、バルク Ge からのピークと比較して、 $\Delta\omega \sim -0.7 \text{ cm}^{-1}$  のシフトが観察された。二軸引張ひずみ  $\epsilon_{II} \sim 0.16\%$  が存在することを意味する。10  $\mu\text{m}$  幅では、100  $\mu\text{m}$  幅とほぼ同じ  $\Delta\omega$  を示したが、10  $\mu\text{m}$  以下になると細線幅減少とともに負側へのシフトは減少し、バルク Ge に対するピーク位置に近づいた。これは引張ひずみの緩和が起っていることに対応する。1  $\mu\text{m}$  まで幅を狭めると  $\Delta\omega \sim -(0.3 \sim 0.4) \text{ cm}^{-1}$  となった。100  $\mu\text{m}$  幅の場合のほぼ半分である。幅方向には引張ひずみが緩和されるものの、長さ方向にはひずみ緩和が起こらないことを反映した結果と考えられる。

図 6(b)は、細線幅の異なる Ge 層に対する PL スペクトルをまとめたものである。バルク Ge では、直接遷移バンドギャップ 0.80 eV に対応する PL ピークが約 1.55  $\mu\text{m}$  に観測された。PL ピークが非対称であるため、発光ピーク位置として半値中心波長を丸印で示した。100  $\mu\text{m}$  幅では PL ピークはバルク Ge よりも約 30 nm だけ長波長に位置した。引張ひずみが存在するため直接遷移バンドギャップが縮小し、長波長で発光したと解釈できる。また、発光ピークの位置より、C-HH

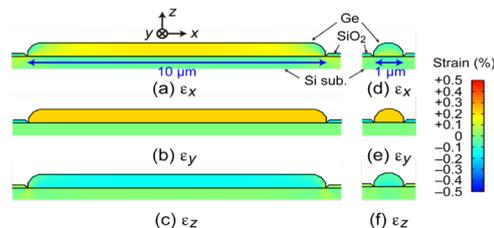


図 2 Ge 細線中の  $x$ ,  $y$  および  $z$  方向の格子ひずみ分布. 幅 10  $\mu\text{m}$  ((a)~(c)) および幅 1  $\mu\text{m}$  ((d)~(f)).

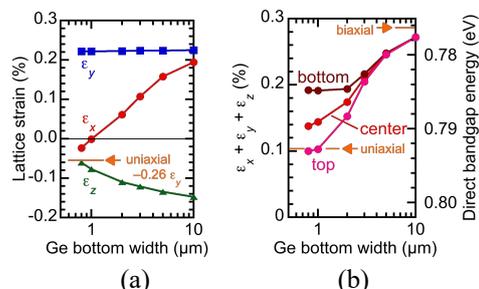


図 3 (a) Ge 細線の中央部における格子ひずみ、および (b) Ge 細線の底部の幅に対する体積ひずみ.

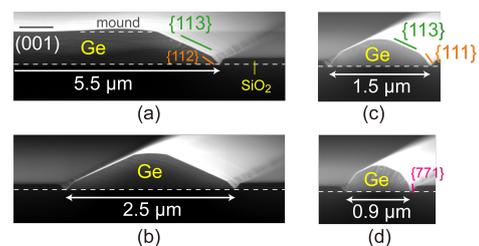


図 4 Si 上に選択成長した Ge 細線構造の典型的な SEM 像 (底部の幅: (a) 5.5  $\mu\text{m}$ 、(b) 2.5  $\mu\text{m}$ 、(c) 1.5  $\mu\text{m}$ 、および (d) 0.9  $\mu\text{m}$ ).

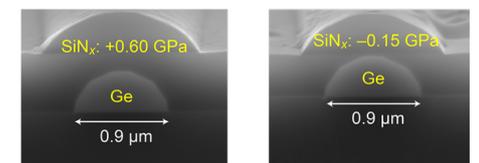


図 5 SiN<sub>x</sub>層で被覆した Si 上 Ge 細線構造の典型的な SEM 像 (細線底部の幅 0.9  $\mu\text{m}$ ).

遷移（重い正孔バンドへの電子遷移）が PL 発光に支配的であったことがわかる。C-LH 遷移（軽い正孔バンドへの電子遷移）よりも状態密度が高いことを反映している。10  $\mu\text{m}$  以下に細線幅を狭めると、ひずみ緩和によって直接遷移バンドギャップが拡大し、徐々にピーク位置が短波長化した。1  $\mu\text{m}$  幅の PL 発光の中心波長は、無ひずみのバルク Ge に近づいている。1.55  $\mu\text{m}$  帯（C 帯：1.530–1.565  $\mu\text{m}$ ）で動作する電界吸収型光変調器に有用であると考えられる。

#### (4) Ge 細線横方向 pin 型受光器の受光感度スペクトル

細線幅縮小の効果をより直接的に観測するため、選択成長 Ge 細線を Si 光導波路と集積した横方向 pin 受光器に対して受光感度スペクトルを測定した。図 7(a)に示すように、Si 層上に Ge 細線が形成されたストリップ装荷構造を用いた。図 7(b)は、細線幅が 0.5、0.8、1.2  $\mu\text{m}$  と異なる Ge 受光器（長さ 40  $\mu\text{m}$ ）の典型的な受光感度スペクトルである。ここでは、Franz-Keldysh 効果を最小化するため、0 V におけるスペクトルを測定した。測定範囲の最短波長である 1.46  $\mu\text{m}$  での受光感度は 0.2 A/W であり、Ge 幅にほとんど依存しなかった。チップ端での -7 dB の結合損失を差し引くと約 1.0 A/W に相当する。量子効率率は約 80% の高い値であることがわかる。1.2  $\mu\text{m}$  幅では波長 1.56  $\mu\text{m}$  を超えると受光感度が低下し始めた。一方、0.8  $\mu\text{m}$  幅および 0.5  $\mu\text{m}$  幅では、それぞれ約 1.53  $\mu\text{m}$  および 1.50  $\mu\text{m}$  で低下し始めた。これは、Ge 細線幅が狭くなるにつれて光吸収スペクトルが短波長シフトしている直接的な証拠である。1.55  $\mu\text{m}$  帯/C 帯で動作する電界吸収型光変調器を実現できることを意味している。

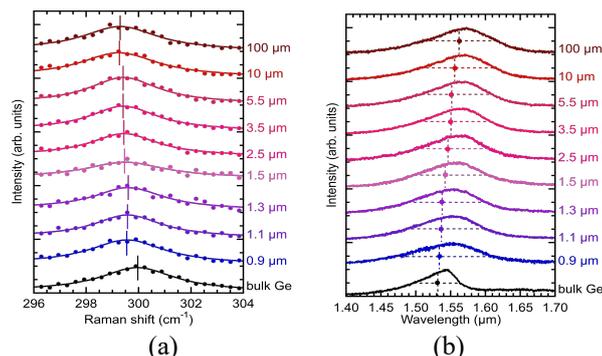


図 6 (a) ラマンスペクトルの細線幅依存性、および (b) PL スペクトルの細線幅依存性。

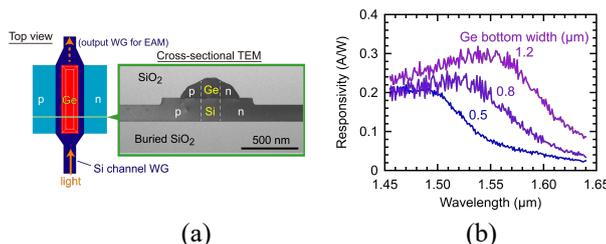


図 7 (a) Ge 細線構造横方向 pin 受光器の概略図と典型的な断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像、および (b) 30°C における典型的な受光感度 (responsivity) スペクトル。

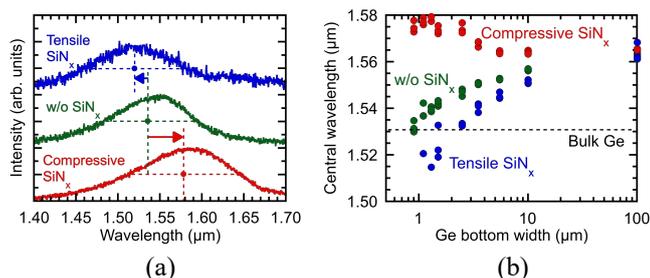


図 8 (a) PL スペクトル (Ge 幅：1.1  $\mu\text{m}$ ) に対する  $\text{SiN}_x$  応力膜の堆積効果、および (b) PL ピークの半値中心波長の Ge 細線幅依存性。

#### (5) 外部応力膜の併用による直接遷移バンドギャップの拡大・縮小制御

図 8(a)は、PL スペクトルに対する  $\text{SiN}_x$  応力膜の堆積効果をまとめたものである。幅 1.1  $\mu\text{m}$  の Ge 細線で結果を比較した（最小線幅 0.9  $\mu\text{m}$  では引張  $\text{SiN}_x$  応力膜の場合に PL 強度が著しく低かったため：直接バンドギャップ拡大は PL 発光には不利となる）。引張応力を内蔵する  $\text{SiN}_x$  を堆積すると下地の Ge 細線に圧縮応力が印加され、PL 発光ピークは短波長側にシフトした。一方、圧縮応力を内蔵する場合、長波長シフトが観察された。

図 8(b)は、PL 発光の中心波長を Ge 幅に対してまとめたものである。幅の広い Ge (100  $\mu\text{m}$ ) では、 $\text{SiN}_x$  応力膜を堆積しても Ge 層を弾性変形できないため、発光波長のシフトは観察されなかった。Ge 幅を 1  $\mu\text{m}$  程度まで縮小した構造では、引張  $\text{SiN}_x$  層を堆積することで約 20 nm の短波長シフトを誘起できた。目標としたバンドギャップの制御範囲 (0.77 (初期状態) ~0.82 eV) を達成できた。Ge 電界吸収型光変調器が C 帯全体で動作できることを示唆している。 $\text{SiN}_x$  応力膜の堆積を最適化することにより、さらなるシフトを引き起こすことも期待できる。なお、圧縮応力膜では、最大 1.58  $\mu\text{m}$  までの長波長シフトが見られた。これは 100  $\mu\text{m}$  幅の Ge に対する 1.56  $\mu\text{m}$  よりもさらに約 20 nm 長い。L 帯 (1.565–1.625  $\mu\text{m}$ ) での受光感度を向上することに利用可能である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sonoji Shuhei, Katamawari Riku, Shimokawa Manami, Inaba Kyosuke, Piedra-Lorenzana Jose A., Hizawa Takeshi, Fujikata Junichi, Ishikawa Yasuhiko	4. 巻 58
2. 論文標題 Direct Bandgap Control by Narrowing the Germanium Strip Structure on Silicon for C+L Band Photonic Devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Quantum Electronics	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JQE.2022.3203128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujikata Junichi, Noguchi Masataka, Katamawari Riku, Inaba Kyosuke, Ono Hideki, Shimura Daisuke, Onawa Yosuke, Yaegashi Hiroki, Ishikawa Yasuhiko	4. 巻 31
2. 論文標題 High-performance Ge/Si electro-absorption optical modulator up to 85 °C and its highly efficient photodetector operation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 10732 ~ 10732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.484380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kuzutani Mikiya, Furuya Satoki, Piedra Lorenzana Jose Alberto, Hizawa Takeshi, Ishikawa Yasuhiko	4. 巻 109
2. 論文標題 A Near-Infrared pin Photodetector of Strain-Enhanced Ge Layer Epitaxially Grown on a Bonded Si-on-Quartz Wafer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 29 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10904.0029ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Katamawari Riku, Kawashita Kazuki, Hizawa Takeshi, Ishikawa Yasuhiko	4. 巻 39
2. 論文標題 Si-capping-induced surface roughening on the strip structures of Ge selectively grown on an Si substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science and Technology B	6. 最初と最後の頁 042204 ~ 042204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/6.0001142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishikawa Yasuhiko, Noguchi Kyosuke, Tachibana Mayu, Kawashita Kazuki, Oyamada Ryota, Motomura Kazuki, Sonoi Shuhei, Katamawari Riku, Hizawa Takeshi	4. 巻 104
2. 論文標題 (Invited) Selective Epitaxy of Submicron Ge Wire Structures for Photodetectors and Optical Modulators in Si Photonics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 147 ~ 155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/10404.0147ecst	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chombo Joshua, Bin Amin Mohd Faiz, Piedra-Lorenzana Jose A., Hizawa Takeshi, Yamane Keisuke, Jiang Mingjun, Ahn Donghwan, Wada Kazumi, Ishikawa Yasuhiko	4. 巻 63
2. 論文標題 Anti-relaxation of tensile lattice strain in Si-embedded Ge strip structure for photonic device applications	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03SP32 ~ 03SP32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad2137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 M. Kuzutani, S. Furuya, J. A. Piedra Lorenzana, T. Hizawa, and Y. Ishikawa
2. 発表標題 A Near-Infrared Pin Photodetector of Strain-Enhanced Ge Layer Epitaxially Grown on a Bonded Si-on-Quartz Wafer
3. 学会等名 242nd ECS Meeting, 10th International SiGe, Ge, and Related Compounds: Materials, Processing, and Devices Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiko Ishikawa, Jose A. Piedra-Lorenzana, Takeshi Hizawa, and Junichi Fujikata
2. 発表標題 CVD Growth and Photonic Device Application of Ge Strip Structure on Si
3. 学会等名 9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-IX) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Fujikata, Masataka Noguchi, Tomoki Sakuma, Daisuke Okamoto, Yasuhiko Ishikawa, and Shiyoshi Yokoyama
2. 発表標題 High Performance Si Photonics Devices and InP/E0 Polymer Hybrid Optical Modulator for Data Communication and Computing
3. 学会等名 27th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing 2022 (OECC/PSC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子尚平、Jose A.Piedra-Lorenzana、藤方潤一、石川靖彦
2. 発表標題 Ge細線構造を用いた導波路受光器における受光スペクトルの温度依存性
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2022 (PDW2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 葛谷樹矢、古家聖輝、Jose A. Piedra-Lorenzana、飛沢健、石川靖彦
2. 発表標題 貼り合わせSi-on-quartzウエハ上ひずみ増強Ge層を用いたフリースペース近赤外pin受光器
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2022 (PDW2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤方潤一、野口将高、佐久間智己、岡本大典、石川靖彦、横山士吉
2. 発表標題 データ伝送およびコンピューティングに向けた高性能SiフォトニクスデバイスおよびInP/E0ポリマーハイブリッド光変調器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川靖彦
2. 発表標題 Ge細線構造を用いた光デバイス
3. 学会等名 電子情報通信学会光集積及びシリコンフォトニクス特別専門研究委員会 (PICS) 研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 葛谷樹矢、古家聖輝、Jose A. Piedra-Lorenzana、飛沢健、石川靖彦
2. 発表標題 貼り合わせSi-on-quartzウエハ上ひずみ増強Ge層を用いた近赤外pin受光器
3. 学会等名 電子情報通信学会光集積及びシリコンフォトニクス特別専門研究委員会 (PICS) 研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuhiko Ishikawa, Kyosuke Noguchi, Mayu Tachibana, Kazuki Kawashita, Ryota Oyamada, Kazumi Motomura, Shuhei Sono, Riku Katamawari, and Takeshi Hizawa
2. 発表標題 Selective Epitaxy of Submicron Ge Wire Structures for Photodetectors and Optical Modulators in Si Photonics
3. 学会等名 240th ECS Meeting, G02 Semiconductor Process Integration 12 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 葛谷樹矢、園井柊平、石川靖彦
2. 発表標題 Near-infrared pin Photodiode of Strain-enhanced Ge Layer on Si
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2021 (PDW2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 葛谷樹矢、園井柊平、石川靖彦
2. 発表標題 引張ひずみを増強したSi上Ge層を用いた近赤外pin受光器
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下川愛実、園井柊平、片廻陸、石川靖彦
2. 発表標題 サブミクロン細線構造を用いたSi上Geエピタキシャル層のバンドギャップ制御
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会 (ED) / シリコンデバイス・材料研究会 (SDM) / 電子部品・材料研究会 (CPM) 合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jose A. Piedra-Lorenzana, Shohei Kaneko, Takaaki Fukushima, Takeshi Hizawa, Keisuke Yamane, Junichi Fujikata, and Yasuhiko Ishikawa
2. 発表標題 AlN Stressor for Near-infrared Ge-on-Si Photonics Devices
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koji Abe, Mikiya Kuzutani, Satoki Furuya, Jose A. Piedra-Lorenzana, Takeshi Hizawa, and Yasuhiko Ishikawa
2. 発表標題 Reduced peripheral leakage current in pin photodetectors of Ge on n-type Si by P implantation to compensate surface holes
3. 学会等名 2023 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Kaneko, Jose A. Piedra-Lorenzana, Keisuke Yamane, Junichi Fujikata, and Yasuhiko Ishikawa
2. 発表標題 Strip-Width-Dependent Spectral Responsivity in a Waveguide Photodetector of Ge by Selective-Area Chemical Vapor Deposition on Si
3. 学会等名 2023 International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures / International SiGe Technology and Device Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shohei Kaneko, Jose A. Piedra-Lorenzana, Keisuke Yamane, Junichi Fujikata, and Yasuhiko Ishikawa
2. 発表標題 Franz-Keldysh Effect in Lateral pin Photodetectors of Ge Strip on Si at C-, L-, and U-band Wavelengths
3. 学会等名 2024 IEEE Silicon Photonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阿部洸司、葛谷樹矢、古家聖輝、Jose A. Piedra-Lorenzana、飛沢健、石川靖彦
2. 発表標題 引張格子ひずみを増強したGe層を用いたSi上フリースペース近赤外受光器の特性評価
3. 学会等名 第21回赤外放射応用関連学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 金子尚平、Jose A. Piedra-Lorenzana、藤方潤一、石川靖彦
2. 発表標題 Si上Ge細線構造を用いた横型p-i-n受光器におけるLおよびU帯での受光感度向上
3. 学会等名 Photonic Device Workshop 2023 (PDW2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川靖彦
2. 発表標題 Si上Ge層のCVD成長と集積光デバイス応用
3. 学会等名 2023年度東海ニューフロンティアワークショップ (NFRW) ・東海地区若手チャプタージョイントワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jose A. Piedra-Lorenzana, Shohei Kaneko, Takaaki Fukushima, Keisuke Yamane, Junichi Fujikata, and Yasuhiko Ishikawa
2. 発表標題 AlN film by reactive sputtering as a stressor for Ge photonic devices on Si
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス研究会 (ED) / シリコンデバイス・材料研究会 (SDM) / 電子部品・材料研究会 (CPM) 合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤真希斗、西依輝、Jose A. Piedra-Lorenzana、飛沢健、石川靖彦
2. 発表標題 バルクSi上への光集積に向けたSiGe/Ge層のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子尚平、Jose A. Piedra-Lorenzana、藤方潤一、石川靖彦
2. 発表標題 Si上Ge細線構造を用いた導波路受光器の受光スペクトルと温度依存性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ  
<https://www.int.ee.tut.ac.jp/photon/>

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	和田 一実  (Wada Kazumi)	米国・マサチューセッツ工科大学・材料理工学科・客員教授	
研究協力者	アン ドンファン  (Ahn Donghwan)	韓国・国民大学校・材料理工学科・教授	
研究協力者	藤方 潤一  (Fujikata Junichi)  (00869159)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・教授  (16101)	
研究協力者	ピエドラ ロレンサナ ホセ アルベルト  (Piedra-Lorenzana Jose Alberto)  (80909747)	豊橋技術科学大学・工学研究科・助教  (13904)	

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	国民大学校			
米国	マサチューセッツ工科大学			